Resources Recycling
Vol. 30, No. 5, 2021, 17-24
https://doi.org/10.7844/kirr.2021.30.5.17
pISSN : 2765-3439 eISSN : 2765-3447

≫ 연구논문 ≪

순환 골재 생산을 위한 다단 박리형 볼밀 시스템 개발

이한솔* · 유명렬** · §이훈***

*과학기술연합대학원대학교 자원순환공학과, **제로에미션, ***한국지질자원연구원

The Development of Multi Stage Separation Ball Mill for Producing Recycled Aggregate

Han-Sol Lee*, Myouing-yuol Yu and §Hoon Lee*****

**University of Science and Technology, 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34113, Republic of Korea,*
***Zero Emission Co., Ltd., Seoul 04415, Republic of Korea*
****Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 34132, Republic of Korea*

요 약

천연골재의 지속적인 개발은 환경 및 자원고갈 문제를 발생시키기 때문에 건설폐기물은 원활한 골재 수급을 위한 중요한 원료이다. 대부분의 순환골재 처리업체에서 생산되는 순환 골재는 시멘트 페이스트 및 모르타르 부착률이 상대적으로 높아 흡수율과 밀도에 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 순환 골재의 품질을 개선하기 위해 볼의 혼합 방지와 움직임을 개선할 수 있는 체가 적용된 다단 박리형 볼밀을 활용하였다. 생산된 제품을 순환 골재로 사용하기 위해 품질 조건 만족 여부를 확인하였다. 최종적으로 다단 박리형 볼밀은 시멘트 페이스트와 모르타르를 효율적으로 단체 분리할 수 있었으며, 순환골재 생산에 적합한 장비임을 확인하였다.

주제어 : 순환골재, 파분쇄, 다단 박리용 볼밀

Abstract

Natural aggregate regular exploitation has led to environmental and resource depletion issues; consequently, construction waste has become an important raw material in the supply of aggregate smoothly. The recycled aggregate produced in the most of recycled aggregate processing company in Korea has a high adhesion ratio of cement paste and mortar, which affects the water absorption ratio and density. Therefore, the quality of recycled aggregate needs to be improved. In this study, we improved the quality of recycled aggregate through the use of a multistage separation ball mill. This ball mill has a sieve which protects the ball mix and improves the motion. Products produced by using multistage separation ball mill were compared with various quality standard for utilization as recycle aggregate. Finally, we confirmed that the multistage separation ball mill can efficiently separate cement paste and mortar from natural aggregate and that it is suitable for the production of recycled aggregates.

Key words : Recycled aggregate, multi stage separation ball mill, crushing

· Received : August 18, 2021 · Revised : September 23, 2021 · Accepted : September 27, 2021
§ Corresponding Author : Hoon Lee (E-mail : hoonlee@kigam.re.kr)
Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124, Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Korea
ⓒThe Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

천연 골재 채취로 인해 매년 여의도 면적의 103배에 달하는 산림과 자원 환경이 소모되고 있으며 이를 해결하기 위해 2017년 정부는 골재원을 다변화하고 바닷모래 채취를 선진국 수준인 5%로 감축하는 골재수급 안정대책을 추진하였다[1]. 19년 기준 천연골재 비율은 56.3%(하천 1.3%, 육상 5.6%, 바다 7.9%, 산림 41.5%)이며, 나머지 43.7%는 물리/화학적 가공을 거쳐 생산되는 순환골재로 중요성이 대두되고 있다[2]. 순환 골재의 원재료인 건설 폐기물은 2019년 약 8천만 톤으로 2014년 6천 7백 톤 이후 매년 평균 약 3 %씩 꾸준하게 증가하고 있으며, 전체 폐기물(가정 및 사업장 생활폐기물, 사업장 배출시설계폐기물, 건설폐기물) 중 44.5%의 점유율을 보이고 있다[3].

순환골재를 다양한 방법으로 재활용하기 위해 철근콘크리트 보에 적용[4-7], 순환골재 치환율에 따른 콘크리트 물성 연구[8-11] 등과 같은 다양한 연구들이 수행되었다. 이처럼 대부분의 연구는 순환골재를 콘크리트로 활용하는 방법으로 수행되었으나 현재 한국의 대부분의 건설폐기물 중간처리 업체들에서 생산된 순환골재는 콘크리트용 순환골재 품질 기준을 달성하지 못하여 성토 및 복토용으로 사용되고 있다. 이는 기존의 선광용 파분쇄 장비를 단순히 입도감소에만 초점을 맞추어 제품을 생산하여 천연골재에 부착된 시멘트 페이스트와 모르타르가 처리과정에서 충분한 단체분리가 이루어지지 않아 순환골재 품질 저하를 발생시키기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 현재 대다수 건설폐기물 중간처리 업체에서 적용하고 있는 공정에 볼의 혼합방지와 움직임을 개선할 수 있는 선별체가 내부에 장착된 다단 박리형 볼밀을 적용하여 천연골재에서 시멘트 페이스트와 모르타르의 단체 분리를 통해 순환골재의 품질을 향상시키고자 하였다.

건설폐기물을 고부가가치용 순환골재로 재활용하기 위해서는 다양한 품질조건을 만족시켜야한다. 본 연구에서는 다단 박리형 볼밀을 실험조건에 따라 실험을 진행한 후 생산된 제품의 입도분포, 흡수율 및 환경성 분석을 통해 새로 적용된 장비의 순환골재 품질 향상 가능성에 대한 연구를 수행하였다. 결과적으로 다단 박리형 볼밀은 폐콘크리트에서 천연골재와 시멘트 페이스트 및 모르타르를 효율적으로 제거하여 원골재 손상을 최소화하면서 높은 원골재 추출율을 얻을 수 있으며, 순환골재 품질 개선에 적합한 장비임을 확인하였다.

2. Recycled aggregate process

건설 해체 시 발생하는 건설폐기물은 중간처리 업체에서 수거하여 파쇄, 분급 및 선별 공정을 거쳐 순환 골재로 재활용된다. 본 연구에서는 순환골재 공정에서 일반적으로 사용되는 공정에 다단 박리형 볼밀을 적용하였으며 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 먼저, 호퍼에 투입된 건설폐기물은 그리즐리 스크린을 이용하여 1차적으로 토사를 제거한 후 1차 파쇄 장치인 조크러셔를 이용하여 150 mm 이하 크기로 파쇄된다. 파쇄된 시료는 1차 자력 선별기를

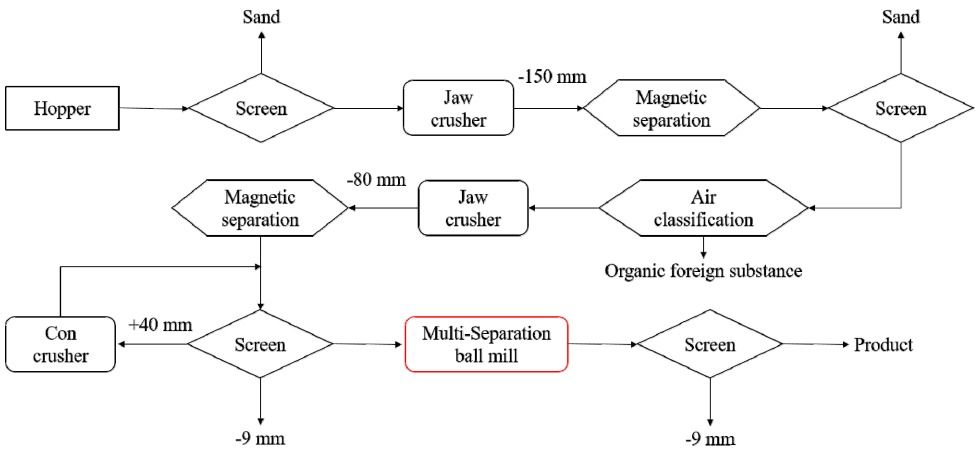


Fig. 1. The recycled aggregate production process used in this study.

Table 1. The quality standard of recycled aggregate for concrete

Parameter		Quality standard
Absolute dry density (g/cm^3)		over 2.5
Water absorbtion ratio (%)		under 3.0
Abrasion weight reduction (%)		under 40
Percentage of absolute volume (%)		over 55
0.08mm sieve passing amount (%)		under 1.0
Clay amount (%)		under 0.2
Impurity contents(%)	organic (volume)	under 1.0
	inorganic (mass)	under 1.0
Stability (%)[16]		under 12
ASR reaction[17]		harmful / harmlessness

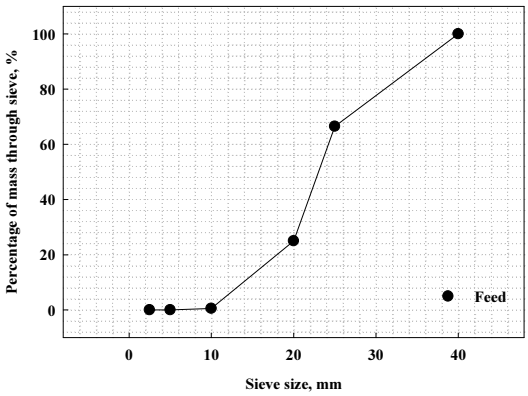


Fig. 2. The particle size distribution of sample.

이용하여 폐콘크리트 내부에 존재하는 철을 제거하고 스칼핀 스크린을 이용하여 2차적으로 토사를 제거한다. 이후 풍력 선별기를 이용하여 가벼운 유기 이물질을 제거한 후에 조크러셔를 이용하여 2차 파쇄하여 80 mm 이하로 만든다. 2차 자력 선별기는 아직 선별되지 않은 철을 선별하고 스크린을 통해 40 mm 이상은 3차 파쇄기인 콘크러셔로 공급하여 40 mm 이하로 파쇄하고, 9 mm 이하는 석분으로 선별한다. 최종적으로 다단 박리형 볼밀에는 40~9 mm 크기의 폐콘크리트가 feed로 투입되며, 다단 박리형 볼밀을 통해 생산된 제품은 9 mm 이하를 잔골재용으로 분급 후에 최종 제품으로 생산된다. 잔골재의 경우 10 mm 이하 크기에서 입도분포 품질 기준을 가지고 있기 때문에 본 연구에서 9 mm로 이하 크기는 순환 잔골재용으로 구분하였다. 건설폐기물을 고부가가치의 순환골재로 생산하기 위해서는 Table 1과 같은 다양한 품질 조건을 만족해야하며, 건설폐기물을 처리할 때 천연골재와 페이스트를 구분하지 않고 가공하는 장비는 효율적인 품질 개선이 이루어지지 않는다[12]. 따라서 본 연구에서는 볼 크기에 따라 입자에 가해지는 힘이 다르다는 점을 착안하여 파쇄용, 박리용 볼을 구분할 수 있는 다단 박리형 볼밀을 적용하였다.

3. Materials and methods

3.1. Materials

본 연구에서 사용된 시료는 창녕 ㈜두남환경에 수거된 건설폐기물을 이용하였으며, 앞서 언급된 처리 공정의 자력선별기와 풍력선별기를 이용하여 대부분의 철과 이물질을 제거한 상태이다. 시료의 입도분포는 40~9 mm의 크기로 Fig. 2와 같은 입도분포를 보이고 있으며, 굵은 순환골재로 재활용하기 위해서는 추가 파쇄 과정이 필요한 것으로 판단되었다.

3.2. Development of inner separation sieve and ball

본 연구에서 사용된 볼밀은 1단, 2단, 3단에 투입되는 볼의 크기와 개수를 조절하여 천연골재에서 시멘트 페이스트 및 부착 모르타르를 박리하는 장비로 볼 혼합방지용 내부 선별체가 필수적이다. 중앙에 위치한 구멍은 각 단의 볼 크기 및 개수를 조절하기 위한 공간이며, 시료의 이동성을 확보하기 위해서 매시 형태가 아닌 긴 사각형 형태의 슬릿으로 설계하였다. 최초에는 Fig. 3a과 같이 반구 형태로 제작하였으나, 반구 형태의 선별체는 밀의 회전으로 인해 볼이 내벽을 따라 돌면서 옆단으로 넘어가는 현상이 발생하였다. 이를 해결하기 위해 Fig. 3b와 같이 선별체를 곡면이 아닌 직선의 형태로 제작하였다. 직선 형태의 선별체는 내부에서 각 단에 설정한 볼 크기와 개수가 되여 파쇄용과 박리용 볼 구분이 가능하다고 판단하였다.

볼의 경우 Fig. 4과 같이 요철형으로 제작하여 실험을 진행하였으나, 일정한 제작이 어려우며 분쇄 효율면에서도 특이점을 찾지 못하여 원형으로 최종 제작하였다. 볼 마모는 내부 선별체로 구분하여 크기별로 장입하기 때문에 크기에 관계없이 일정한 비율로 발생하였다.

(a)

(b)

Fig. 3. The inner separation sieve used in this study.

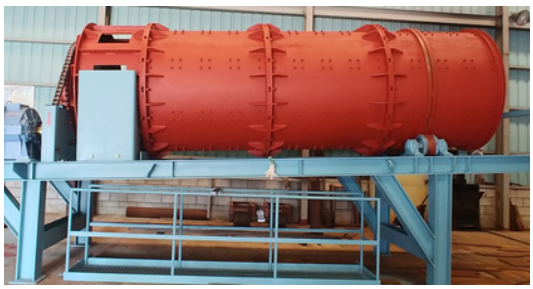
Fig. 4. The ball type developed in this study (circle and irregularity).

3.3. Grinding conditions

본 연구에서는 천연골재에 부착되어 있는 페이스트와 모르타르를 효과적으로 제거할 수 있도록 파쇄용 볼과 박리용 볼을 나눌 수 있는 중간 분리막이 적용된 다단 박리형 볼밀을 설계하였다. 다단 박리형 볼밀은 총 3단으로 구분하여 1단, 2단, 3단 순으로 볼의 크기를 감소시켜 물질

Table 2. Experimental grinding conditions in this study

para-meter	Ball size, mm	Ball number, ea				Feed size, mm	Mill angle, degree	Rota-tion speed, rpm
		1 stage	2 stage	3stage				
				J1	J2			
Value	200	11	11	0	0	40~9	2.2	26
	160	28	33	0	0			
	120	6	20	98	98			
	100	0	20	98	78			



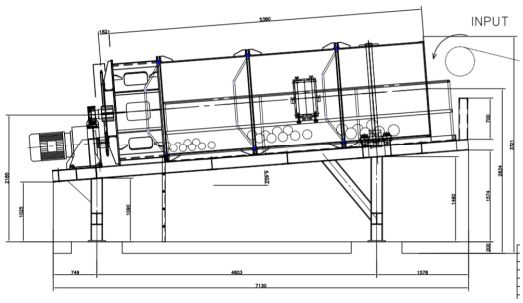


Fig. 5. The multi stage separation ball mill.

흐름에서 입자에 가해지는 힘을 구분할 수 있도록 하였다. 다단 박리형 볼밀은 투입 골재 크기, 밀 회전속도, 밀 각도, 볼의 크기 및 개수와 같은 다양한 실험 변수가 있지만, 이 중 페이스트 박리에 가장 큰 영향을 미치는 볼 크기 및 개수를 J1, J2 조건으로 설정하고 이를, 제외한 나머지 변수를 투입 골재 크기 40~9 mm, 밀 회전속도 26 rpm 및 각도 2.2도로 고정한 후 실험하였다. 또한, 본 연구에서 사용된 볼은 stainless steel 재질을 사용하였으며, 파쇄 실험에 사용된 실험 조건과 다단 박리형 볼밀의 외부 및 내부 사진은 각각 Table 2, Fig. 5에 나타냈다.

또한, 폐콘크리트를 순환골재로 재활용하기 위해서는 입자 크기 조건을 만족하여야 한다. 따라서 다단 박리형 볼밀을 통해 생산된 제품의 입도분포를 분석하였다.

입자분포 분석은 KS F 2527 시험법에 규정된 순환 골재 기준을 따라 25 mm, 10 mm, 5 mm, 2.5 mm 크기의 실험실 규모 건식 체를 ro-tap sieve shaker에 적용하여 수행하였다[13].

3.4. Water absorption ratio and absolute dry density analysis

본 연구에서는 파쇄용 볼과 박리형 볼을 구분하여 입자에 힘을 가할 수 있는 다단 박리형 볼밀을 적용하였으며, 각 실험 조건 별 투입되는 샘플과 생산되는 입자의 절대 건조 상태의 시료 밀도와 흡수율을 측정하였다. 측정 방법은 KS F2503에서 정의하고 있는 방법으로 진행하였으며, 시험 방법은 다음과 같다[14]. 1) 시료를 물로 충분히 씻어 입자 표면의 불순물 및 그 밖의 이물질을 제거한 후 시료를 철망태에 넣고, 수중에서 충분히 흔들어 입자 표면에 부착된 공기와 입자들 사이에 갇힌 공기를 제거한 후 물속에 24시간 침지시킨다. 2) 침지된 시료의 수중 질량(C)과 수온을 측정한다. 3) 철망태와 시료를 수중에서 꺼내고 물기를 제거한 후 시료를 흡수 천으로 눈에 보이는 수막을 제거하여 표면 건조 포화 상태의 질량(B)을 측정한다. 4) 105°C에서 질량의 변화가 없을 때까지 건조시키고 실온까지 냉각시켜 절대 건조 상태의 질량(A)을 측정한다. 측정된 값을 식 1, 2에 적용하여 절대 건조 상태의 밀도와 흡수율을 측정하였다.

$$D_d = \frac{A}{(B-C)} \times \rho_W \quad (1)$$

(D_d : 절대 건조 상태의 시료 밀도(g/cm^3), A : 절대 건조 상태의 시료 질량(g), B : 표면 건조 포화 상태의 시료 질량(g), C : 침지된 시료의 수중 질량(g), ρ_W : 시험 온도에서의 물의 밀도(g/cm^3))

$$Q = \frac{(B-A)}{A} \times 100 \quad (2)$$

(Q : 흡수율(%))

4. Results

4.1. Particle size distribution analysis

콘크리트용 순환 굵은 골재는 KS F2526에서 규정한 입도분포를 만족하여야 하며 품질 기준은 Table 3에 나타냈다[13]. 다단 박리형 볼밀을 이용하여 40~9 mm 크기 입자를 파쇄 실험 하였으며, Fig. 6에 순환 굵은 골재 품질기준, feed 및 조건 별 파쇄 산물의 입도분포를 나타냈다. 20 mm 체를 통과한 비율은 J1 95.3%, J2 100.0%이며, 10 mm를 통과한 시료의 비율은 J1 35.7%, J2 23.1%로 나타났다. 기본적으로 J1, J2 조건 모두 콘크리트용 순환 굵은 골재 입도 기준을 만족하고 있지만, 3단에서 100 mm 개수가 20개 적었던 J2의 조건이 J1의 조건보다 상대적으로 작은 입자 생성 비율이 낮았다. 이는 1단, 2단을 통과한 입자의 크기가 감소한 상태에서 가장 작은 크기의 볼인 100 mm의 개수가 많을수록 입자에 더 많은 영향을 미친 결과라고 판단된다. 결과적으로 J1과 J2 조건 모두 입도분포 품질 기준을 달성할 수 있지만, 더 적은 볼 개수를 사용하여 에너지 소모를 감소시킬 수 있으며, 잔입자 생성 비율이 상대적으로 낮은 J2 조건이 더 적절하다고 판단하였다. 따라서 다단 박리형 볼밀의 적용은 순환 굵

Table 3. Particle size distribution quality standard of recycled aggregate

Particle size	25 mm	20 mm	10 mm	5 mm	2.5 mm
Percentage of mass through sieve, %	100	90~100	20~55	0~10	0~5

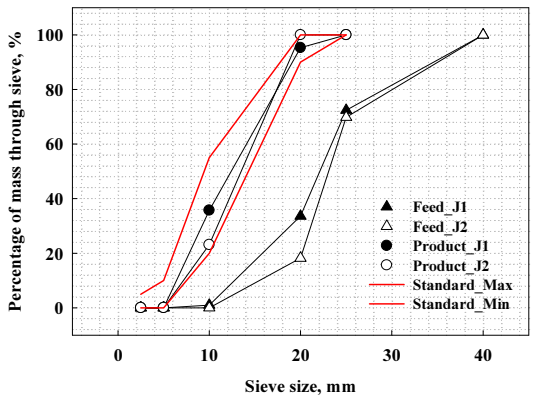


Fig. 6. The particle size distribution of feed and crushed product with different J1, J2 conditions.

은 골재 입도 분포 품질 기준을 달성할 수 있음을 확인하였다.

4.2. Water absorption ratio and absolute dry density

다단 박리형 볼밀을 사용하여 생산된 산물의 절대 건조 밀도 및 흡수율 개선 여부를 확인하기 위해 분석을 수행하였다. 순환 굵은 골재의 품질 기준은 절대 건조 밀도 2.5 g/cm^3 이상, 흡수율 3.0 % 이하를 달성해야한다[15]. Fig. 7에 피더와 생산물의 분석 값을 나타내었다. 다단 박리형 볼밀에 투입된 입자의 절대 건조 밀도의 경우 J1 조건에서 2.31 g/cm^3, J2 2.29 g/cm^{3}로 품질 기준에 미치지 못하는 것으로 나타났지만 생산된 산물의 경우 J1 2.52 g/cm^3, J2 2.53 g/cm^{3}으로 품질 개선이 확인되었다. 투입된 입자의 흡수율 또한, J1 5.71%, J2 5.88%로 품질 기준을 벗어나는 값을 가지는 것으로 나타났으나, 다단 박리형 볼밀로 생산된 산물의 경우 J1 2.70%, J2 2.49%로 눈에 띄는 품질 개선이 확인되었다. 위 결과를 통해 다단 박리형 볼밀은 폐콘크리트에서 천연 골재와 시멘트 페이스트 및 모르타르를 효율적으로 분리할 수 있는 것으로 판단하였다.

4.3. Recycled aggregate quality standard

건설폐기물을 순환 굵은 골재로 재활용하기 위해서는 앞서 측정한 품질 기준 이외에도 Table 4와 같은 품질 기준을 만족시켜야한다[15]. 품질 기준 만족 여부를 확인하기 위해 본 연구에서는 KOLAS 기관인 한국화학융합시험연구원에 품질 분석을 의뢰하였으며, 품질 기준과 분석 결과는 Table 4에 나타냈다. 마모 감량의 경우 파쇄 후 품질 개선이 이루어졌지만 파쇄 이전에도 기준은 만족하고 있는 것으로 나타났다. 용기에 채워진 골재 절대 용적의 그 용기 용적에 대한 백분율인 입자모양 판정 실적률은 파쇄 이전에는 입자의 크기가 너무 커서 측정이 불가능하였으

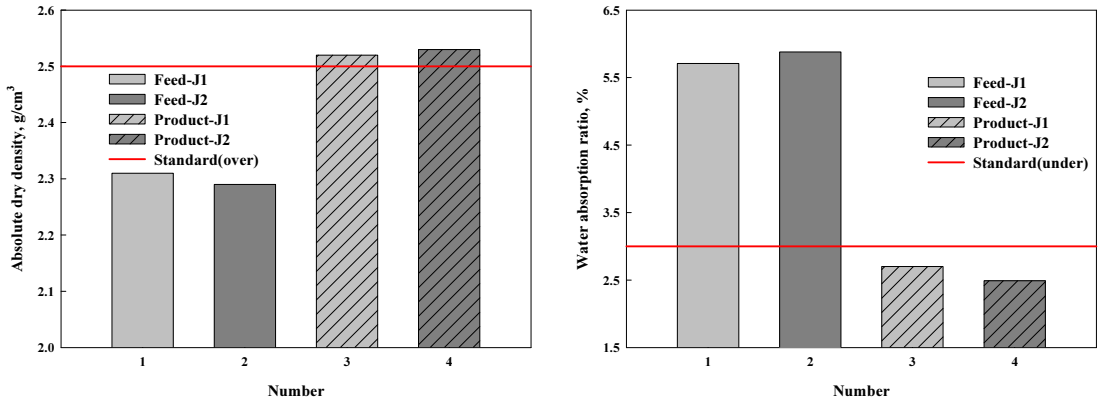


Fig. 7. The water absorption ratio and absolute dry density analysis results.

Table 4. The quality standard of feed and product

Parameter		Quality standard	Feed		Product	
			J1	J2	J1	J2
Abrasion weight reduction (%)		under 40	36.6	39.5	30.5	33.9
Percentage of absolute volume (%)		over 55	measurement impossible		61.1	59.4
0.08mm sieve passing amount (%)		under 1.0	0.2	0.1	0.6	0.5
Clay amount (%)		under 0.2	0.0	0.0	0.1	0.1
Impurity contents (%)	organic (volume)	under 1.0	0.10	0.00	0.00	0.05
	inorganic (mass)	under 1.0	0.00	0.31	0.28	0.26
Stability (%)[16]		under 12	8.9	9.3	6.0	7.1
ASR reaction[17]		harmful/harmlessness	harmlessness	harmlessness	harmlessness	harmlessness

며, 파쇄 후에는 품질 기준을 달성하는 것으로 확인되었다. 0.08 mm 통과량 손실 양과 점토덩어리량은 파쇄 전보다 파쇄 후에 입자의 감소로 인하여 값이 소량 증가하였으나, 두 조건 모두 품질 기준은 만족하는 것으로 나타났다. 안정성은 파쇄 후 산물의 값이 개선되었으며, 유기 및 무기 이물질 함유량은 다단 박리형 볼밀에 적용하기 전에 전처리 과정에서 자력 및 풍력 선별기를 이용하여 충분히 제거된 결과가 나타났다. 마지막으로 알칼리 골재 반응은 모든 조건에서 무해한 것으로 확인되었다. 따라서 품질 기준 분석 결과를 통해 다단 박리형 볼밀은 고부가가치용 순환 골재 생산에 적용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

5. Conclusion

본 연구에서는 건설폐기물을 고부가가치용 순환골재로 재활용하기 위해 파쇄용과 박리용 볼을 구분할 수 있는 다단 박리형 볼밀의 적용 가능성을 확인해보았다. 다단 박리형 볼밀의 볼 장입량을 제외한 조건들은 고정하여 실험을 진행하였으며, 투입 입자와 실험 후 생산되는 산물의 입도분포, 절대 건조 밀도, 흡수율 및 다른 품질 조건을 확인해보았다. 볼 장입량 J1과 J2 조건의 산물의 입도분포 결과, 두 조건 모두 품질 조건을 달성하는 것으로 나타났으나, 볼 장입 개수 및 잔입자 생성 비율을 고려하였을 때 J2 조건이 더 적절하다고 판단하였다. 절대 건조 밀도와 흡수율의 경우 투입 입자에 비해 다단 박리형 볼밀을 통해 생성된 산물에서 높은 품질 개선이 나타났다. 또한, 이외의 품질 기준 분석 결과는 대부분 파쇄 후 산물에서 값이 개선되는 것으로 나타났으며, 상대적으로 그렇지 않은 조건도 품질 기준은 달성하는 것으로 나타났다. 위 결과를 토대로, 다단 박리형 볼밀의 최적 조건 설정을 위한 연구는 추가적으로 수행되어야하지만, 장비를 이용하여 고부가가치용 순환 골재 생산에 적용할 수 있는 장비임을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다 (No.20192520100640).

References

1. KORAS, recycled aggregate.https://www.koras.org/05/value.jsp, August 17, 2021.
2. Jinyoung, L., Hoon, L., Min, H., et al., 2020 : Planning for comprehensive management of industrial stones and natural aggregate resources, pp.12.
3. Ministry of Environment, 2020 : Waste generation and treatment status, pp.9.
4. Wonsuk, L., Hyundo, Y., 2007 : Shear performance of reinforced recycled aggregate concrete beams, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 23(4), pp.19-26.
5. Yonungoh, L., Hyundo, Y., Sunwoo, Kim., et al., 2007 : Experimental study on the flexural and lap splice performances estimation of reiniforced recycled aggregate concrete beams, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 23(5), pp.29-36.
6. Seonhwa, Song, Kisun, Choi, Youngchan, You, et al., 2009 : Flexural behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams, Journal of the Korea Concrete Institute, 21(4), pp.431-439.
7. Wonsuk, Lee, Hyundo, Yun, Sunwoo, Kim, et al., 2007 : The effect of replacement ratio of recyceld coarse aggregate on shear strength of reinforced concrete beams without shrear reinforcement, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 10, pp.3-10.
8. Jongsung, Sim, Cheolwoo, Park, Sungjae, Park, et al., 2006 : Characterization of Compressive Strength and Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete with Respect to Replacement Ratios, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 1, pp.213-218.
9. Heonsoo, Chung, Keunhyeok, Yang, Hyunho, Kim, 2006 : The Influence of the Quality and the Replacement Level of Recycled Aggregate on the Mechanical Properties of Concrete, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 6, pp.71-78.
10. Seungjoe, Yoon, Sooyeon, Seo, Woojin, Lee, et al., 2006 : Concrete physical properties with substitution ratio of recycled Coarse aggregate and recycled fine aggregate, Korea Concrete Institute, 5, pp.161-164.
11. Teawang, Lee, Hyunho, Lee, 2015 : The Characteristic of Compressive Strength by Replacement Ratio of Recycled Aggregate for Concrete, Korea Concrete Institute, 10, pp.531-532.
12. Daehyun, Baek, Dongyeop, Han, Myongyoul, Yu, et al., 2007 : The Quality Properties of Recycled Coarse Aggregate Produced by the Bar-crusher and the Fundamental Properties of Concrete Using Aggregate, Architectural Institute of

Korea, 10, pp.83-90.
13. Korean Agency for Technology and Standards, KS F 2527. https://e-ks.kr/streamdocs/view/sd;streamdocsId=72059201946145309, September 22, 2021.
14. Korean Agency for Technology and Standards, KS F 2503. https://e-ks.kr/streamdocs/view/sd;streamdocsId=72059203150618613, September 22, 2021.
15. National Law Information Center, Recycled aggregate quality standard, https://www.law.go.kr/%ED%96%89%EC%A0%95%EA%B7%9C%EC%B9%99/%EC%88%9C%ED%99%98%EA%B3%A8%EC%9E%AC%ED%92%88%EC%A7%88%EA%B8%B0%EC%A4%80, September 22, 2021.
16. Korean Agency for Technology and Standards, KS F 2507. https://e-ks.kr/streamdocs/view/sd;streamdocsId=72059197094868521, September 22, 2021.
17. Korean Agency for Technology and Standards, KS F 2545. https://e-ks.kr/streamdocs/view/sd;streamdocsId=72059206276510231, September 22, 2021.

이 한 솔

- 2016년 전북대학교 공과대학 자원에너지공학과 공학사
- 2019년 과학기술연합대학원대학교 자원순환공학과 공학석사
- 현재 과학기술연합대학원대학교 자원순환공학과 박사과정

이 훈

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
- 당 학회지 제27권 3호 참조

유 명 렬

- 충남대학교 건축공학 공학사
- 서울대학교 건축공학 공학석사
- 서울대학교 건축공학 공학박사
- 현재 (주)제로에미션 관리이사